



省级电力现货市场全网安全校核

吴迪¹, 王正风¹, 高卫恒¹, 应益强²

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 南瑞集团有限公司 (国网电力科学研究院有限公司) 江苏 南京 211000)

摘要: 分析了以省际交流联络线为等值负荷的市场优化出清模型和安全校核获得出清结果存在偏差的原因及影响, 提出了基于区域全网模型的省级电力现货市场优化出清模型和全网安全校核方法。该方法基于全网的模型方式拼接生成未来时段拓扑断面, 进行全网灵敏度计算, 获取完整的全网灵敏度矩阵用于优化出清与全网安全校核迭代, 获得准确的电网潮流和节点电价。实际系统算例验证了方法的准确性和有效性。

关键词: 现货市场; 节点电价; 调度; 安全校核

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202301016

0 引言

随着中国电力现货市场建设的深入推进, 电力系统“三公”调度将转变为市场环境下的经济调度。市场环境下的经济调度(后文简称为经济调度)充分体现各市场主体资源的优化配置, 但也压缩了电网运行的安全边际, 使阻塞管理的重要性日渐凸显。

电力现货市场通常采用集中式模式, 优化出清的最优解往往会使系统恰好处于某约束的安全稳定边界, 电能平衡和阻塞程度通过节点电价传导给市场主体^[1]。这对出清结果的准确性和电网实时优化调整的精确性尤为重要。国外市场中, 美国 PJM 市场充分考虑电网安全约束及各类运行约束, 在全局范围内统一优化出清, 出清结果可以安全执行^[2-4]。英国电力市场属于分散式市场, 不考虑日前阻塞问题, 实时运行通过一系列平衡机制解决^[5]。文献^[6]分析了电力市场建设路径, 并推荐了 PJM 的模式。

中国电网是以特高压电网为骨干, 网、省区域电网通过交直流联络线实现大规模电力互济的多层级多区域混联复杂输电系统^[7-8]。电网结构的特殊性使得中国电力市场的设置与运营与国外其他国家的电力市场有较多差异。例如, 针对电网

多层级多区域混联的物理结构, 中国现货市场的建设框架也具有网间(网内)、省间(省内)多层级、多区域电力市场的特色, 区域电网间的生产运行管理者和区域电网内的市场运营机构不一致^[9-10]、信息获取范围不同。此外, 中国目前多以省级为单位推行电力市场建设, 省级调度部门负责校核与制定出清结果和发电计划, 并由更高层级的调度机构再统一进行全局范围内的电网安全校核, 即市场运营交易主体需要满足更大范围的电网运行对象的安全校核才能优化出清。交易主体和校核对象范围的不同导致中国在出清流程、电网潮流安全校核和电价形成机制等方面, 均不能照搬国外已有经验。

文献^[11-13]对中国电力市场在“统一市场, 两级协作”的框架下多个省份资源分布和阻塞情况进行了统计分析, 并建议在阻塞严重的地区采用节点电价开展阻塞管理。但在试点省份市场建设过程中, 通常仅将更大范围的电网运行校核在省(网)际联络线处用负荷等值简化, 并在省级电网内部选定平衡机等值更高层级电网的功率松弛功能, 使电网运行校核范围缩小到与市场运营交易范围一致。这种传统的处理方式很容易给电网运行带来安全隐患并偏离经济运行点^[14]。由于省级市场出清时无法获得外网的信息, 电网出清所使用的导纳矩阵存在偏差, 从而引起灵敏度矩阵的偏差^[15]。联络线被等值后, 其功率变量成为常量, 从而失去了所有节点对该线路潮流的灵

收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-04-20。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(52120021N01G)。

敏度，在联络线重载或过载时，不能通过安全校核进行调整机组计划，出清结果难以执行。文献 [16] 探讨了安全校核机制设计的问题，提出了适应复杂市场环境的 3 种解决方案以改进安全校核水平。文献 [17] 运用协同校核机制对出清结果进行校正，局部恢复区域电网的完整性。文献 [18] 设计了适用于电力现货市场运营的省级电网安全校核实现方案，对联络线偏差量进行优化处理。以上各种方案均是调和局部和整体间的矛盾，未消除偏差产生的根本原因。

本文针对上述问题，研究外部模型等值对省级电力市场出清的影响，对平衡机设置造成的近区潮流偏差、等值模型灵敏度带来的潮流分布偏差以及节点电价机制下的阻塞价格偏差进行研究。通过省级和网级电网计算模型和计划数据的拼接，获得较为准确的日前和实时全网方式数据，将等值交流联络线恢复成完整外部电网得到实际灵敏度，再开展省内直流潮流优化出清、计算节点电价以及交流潮流的有功调整，提升出清计划的可执行性以及节点电价计算的合理性。

1 现行省级电力现货市场的边界处理方法

1.1 省级现货市场出清流程

现货市场建设初期，大部分省级电网以发电侧“报量报价”、用户侧“报量不报价”的方式参与双边市场出清^[19]。对于电力富余的省级送端电网，通过日前预出清获得省内机组次日发电计划，富余电力参与省间或更高级区域市场现货交易，作为次日联络线送出计划，然后再进行省内正式出清。省级受端电网根据次日的负荷和省内机组发电预测得到次日的电力缺口，在省间市场申报电力缺额并参与交易，交易出清结果作为次日省际联络线计划，并作为边界开展正式省内市场出清。省内电力现货市场出清流程如图 1 所示。

1.2 省间市场边界处理

省级电力调度调节省内机组使省间交流联络线交换总功率按照区域调度给定的计划执行，保证区域偏差（ACE）和频率在规定范围内波动。在国内现货起步阶段，如图 2 所示，试点省份都是将交流联络线等值为发电机或负荷来处理的。联络线仅是完整电网结构内的一个断面，其内部

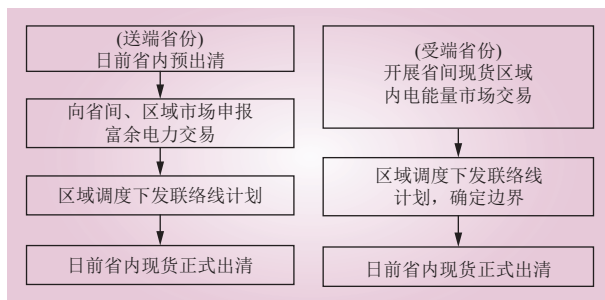


图 1 省内电力现货市场出清流程

Fig. 1 Clearing process of provincial spot market

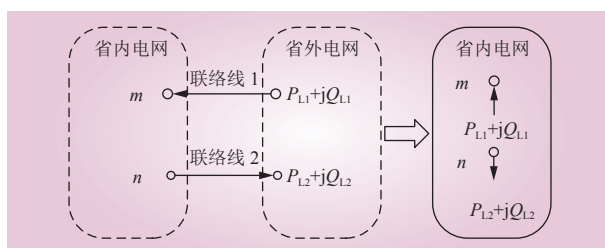


图 2 省际交流联络线的等值处理

Fig. 2 Equivalent process of inter-provincial tie line flows

各条交流线路功率随系统节点发电和负荷变化时刻在改变，因此用固定的发电机或负荷进行联络线等值必然引起潮流分布的偏差。

节点电价出清模型一般包括发电负荷平衡约束、机组出力约束、支路功率约束以及其他设备运行工况约束。根据输电断面输电能力理论，支路功率约束可以描述成线路对发电机的分布因子与有功功率乘积相较断面输电限额的不等式形式^[20]。精确的分布因子可通过交流潮流的灵敏度矩阵得到^[21]，当不关注无功电压时，采用直流潮流模型可以快速得到近似的有功分布因子^[22]。

根据上述分析，当前省级市场出清模式下对灵敏度采取了两次近似，电网等值的处理会引入较大偏差。

2 省级电力现货市场安全校核偏差分析

使用完整的最优潮流对大规模电网求解比较困难，工程应用中一般采用直流潮流优化和使用交流潮流校核的方式。直流潮流计算的平均偏差应用在高压电网中较小，通过交流潮流灵敏度法进行校正后可满足工程实际应用。

在现货市场日前、实时出清过程中，偏差源



自 4 方面：1) 平衡机累积偏差，引起平衡机及其附近潮流分布偏差；2) 等值模型的偏差及其带来的节点灵敏度的偏差；3) 边界数据偏差；4) 直流潮流计算方法本身的偏差。其中后两者偏差主要由客观因素引起，短时无法提高，本文主要针对前两者展开分析，并提出改进方案。

2.1 省内平衡机偏差分析

潮流计算过程中，平衡节点作为其他电压参考基准点，同时起到了松弛节点的作用，平衡全系统功率。实际电力系统通过设置平衡机来满足电网的功率，对应潮流计算中的平衡节点。计算过程中会存在的偏差包括：预测数据的不准确将导致由现货市场出清得到的发电计划的偏差；交流潮流安全校核过程中对 PQ、PV 节点的设定可能与实际情况存在偏差；无功电压造成的有功偏差将体现为各支路潮流偏差。这些偏差将最终体现在平衡机功率上，使平衡节点近区的潮流分布偏差也会较其他节点更大。

平衡机设置方式不同，计算引入的偏差也会有所差异。以某省级电网两回 500 kV 输电通道为例，其偏差影响如表 1 所示。可以发现，即使采用多平衡机方法将偏差分散，总偏差量仍然较大。

表 1 平衡机设置方式对潮流偏差的影响
Table 1 Effect of slack bus selection on power flow results

平衡机设置方式		潮流计算 值/MW	偏差/%
500 kV 线路 A 潮流分析	平衡机设置在省内（单平衡机）	136	30.16
	平衡机设置在省内（多平衡机）	164	16.33
	平衡机设置在省外	185	5.61
	线路 A 实际潮流	196	
500 kV 线路 B 潮流分析	平衡机设置在省内（单平衡机）	337	10.61
	平衡机设置在省内（多平衡机）	353	6.37
	平衡机设置在省外	369	2.12
	线路 B 实际潮流	377	

其主要原因是：在出清计算中，若选取省外的机组作为平衡节点，省内的机组全部是 PV 节点，其有功出力都是确定的，在省内网架确定的情况下，计算获得的省内电网有功潮流分布相对具有较高的精度（满足整个系统的平衡由省外平衡机平衡）；若选取省内机组作为平衡机组，由于联络线的等值误差以及电压相位基点选取的不

同，作为平衡节点的机组需要迭代获得满足省内有功平衡和无功平衡，这样计算获得的差别与实际潮流存在较大误差。

2.2 等值电网灵敏度偏差分析

无论通过交流潮流还是直流潮流计算获得灵敏度，关键问题是模型本身的准确性。传统的省内潮流灵敏度计算将省间联络线进行等值处理，即次日省际联络线交换功率计划按照上一日各时段每条省际联络线的实际潮流等比例分配，等效为负荷，作为市场出清边界。该方法忽略了省内及省外机组调节对省际联络线潮流的影响，造成省内灵敏度偏差较大，省际联络线灵敏度缺失。

在图 3 所示两省级电网互联系统中，M 和 N 为两省级电网， P_1P_2 和 Q_1Q_2 为省间联络线，设 M 内支路 k 两侧的节点为 i、j，由文献 [21] 可知，基于直流潮流模型反映节点注入功率与线路潮流之间的关系为

$$S_{mk} = \frac{X_{mi} - X_{mj}}{x_{ij}} \quad (1)$$

式中： S_{mk} 为节点 m 对支路 k 的灵敏度； X_{mi} 和 X_{mj} 分别为直流潮流阻抗矩阵中对应位置的阻抗值，即 m 点对 i 点和 j 点的等效阻抗； x_{ij} 为节点 i 和 j 间的阻抗。

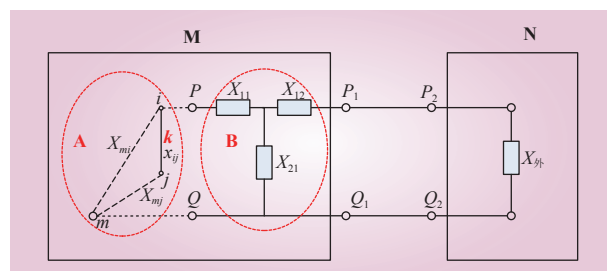


图 3 区域互联电网连接示意

Fig. 3 Regional power grid connection diagram

对图 3 的电网进行等效和拆分，对于线性网络，根据叠加定理和戴维南定理，当对电源点 m 进行分析时，可将区域电网 N 等效为阻抗 $X_{外}$ ，将区域电网 M 等效为网络 A 和网络 B。

对于网络 A，断开其与网络 B 的关联，在节点 m 注入单位电流，在 i 处产生的电压为 U'_{mi} ，即得 $U'_{mi} = X'_{mi}$ ，其中 X'_{mi} 为该情况下 m 点对 i 点的等效阻抗，在网络 B 与区域电网 N 级联后，从 PQ 端口看，其等效阻抗为

$$X_{等效} = X_{l1} + X_{l2} // (X_{l2} + X_{外}) \quad (2)$$

设断开 P 和 Q 端口，网络 A 内部阻抗为 $X_{A内}$ ，将网络 A 与网络 B 关联后，在节点 m 注入单位电流，在 i 处产生的电压为

$$U_{mi} = X_{mi} = \frac{X_{等效} X'_{mi}}{X_{等效} + X_{A内}} = \frac{X'_{mi}}{1 + X_{A内}/X_{等效}} \quad (3)$$

同理可得网络 A 与网络 B 关联后，在节点 m 注入单位电流，在 j 处产生的电压为

$$U_{mj} = X_{mj} = \frac{X_{等效} X'_{mj}}{X_{等效} + X_{A内}} = \frac{X'_{mj}}{1 + X_{A内}/X_{等效}} \quad (4)$$

结合式 (1) (3) (4)，有

$$S_{mk} = \frac{X_{mi} - X_{mj}}{x_{ij}} = \frac{X'_{mi} - X'_{mj}}{(1 + X_{A内}/X_{等效})x_{ij}} \quad (5)$$

对于区域间联络线，若直接等值，则 P_2 端子和 Q_2 端子均连接纯负荷， P_2 和 Q_2 间无耦合连接，即 $X_{外} = \infty$ ，根据式 (2) 可知会造成 $X_{等效}$ 偏大，结合式 (5) 发现， m 点对支路 k 的灵敏度 S_{mk} 偏大。

同理，省外输电设备检修时，外网拓扑变化亦会造成灵敏度偏差，但通常由于电气距离远，影响幅度小。

3 考虑交流联络线功率约束的省级现货市场出清

3.1 区域电网方式数据整合

1) 日前市场出清模型数据拼接。省内模型的次日预测数据（网架模型和发电负荷数据，含上级调度机组次日发电计划）叠加省外出清时刻最新模型（最新时刻前推 96 点的历史状态估计数据）。

2) 实时市场数据拼接及校核。实时市场开展安全约束经济调度（SCED），周期为每 15 min 出清一次，需要提前每 15 min 更新区域电网状态估计数据（QS 文件）和本省电网状态估计数据进行拼接。

全网数据拼接方案如图 4 所示。

3.2 改进节点电价出清模型

在获得全区域电网模型后，将潮流优化计算获得的省际交流联络线的功率作为约束纳入优化模型，而实际省级调度要时刻开展电网调频和区域偏差控制，需要新增区域交换功率计划约束。

日前安全约束机组组合（SCUC）模型的目标函数为全天全网总发电成本最小，可表示为

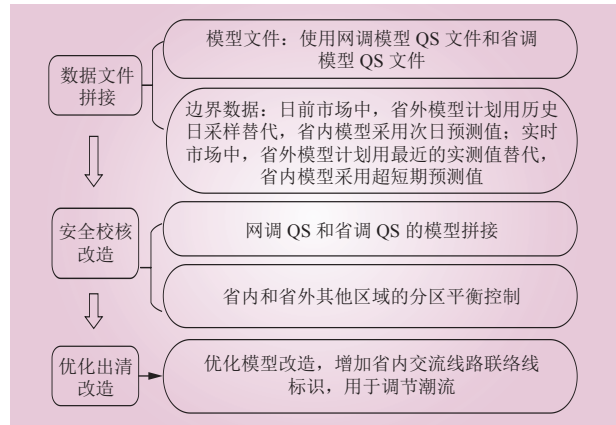


图 4 全网数据拼接方案

Fig. 4 Network wide data consolidation scheme

$$\min_{P_G, U} \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{t=1}^{24} [U_i^t c_i(P_{G_i}) + S_i^t(U_i) U_i^t (1 - U_i^{t-1})] \quad (6)$$

式中： N_G 为发电机组总数； U_i^t 为机组 i 在 t 时刻的状态，0 表示停机，1 表示开机； $S_i^t(U_i)$ 是开机标价（费用），只在开机的时刻大于 0，其余时刻均为 0； $c_i(P_{G_i})$ 为机组 g 运行费用。

约束条件为

$$\sum P_G = \sum P_D \quad (7)$$

$$P_{G,\min} \leq P_G \leq P_{G,\max} \quad (8)$$

$$F_{l,\min} \leq \sum_{g=1}^{N_G} G'_{l,g} p_{g,t} - \sum_{d=1}^{N_D} G'_{l,d} p_{d,t} \leq F_{l,\max}, \forall l, \forall t \quad (9)$$

$$\sum_i^{N_A} P_{L_i} = A_t \quad (10)$$

式中： $\sum P_G$ 为发电机组出力； $\sum P_D$ 为系统负荷； $P_{G,\max}$ 、 $P_{G,\min}$ 分别为机组功率上下限； $G'_{l,g}$ 为修正后的机组 g 对支路 l 的功率转移分布因子； $G'_{l,d}$ 为修正后的负荷 d 对支路 l 的功率转移分布因子； $p_{g,t}$ 为 t 时刻机组 g 的有功功率； $p_{d,t}$ 为 t 时刻负荷 d 的有功负荷； $F_{l,\max}$ 和 $F_{l,\min}$ 分别为支路功率传输的上下限； N_D 为负荷总数； N_A 为省级交流联络线总数； A_t 为 t 时段区域交换计划； P_{L_i} 为交流线路 i 的功率。

总体来说，模型较等值模型仅增加了 m 个联络线断面约束和 1 个区域交换计划约束，优化模型规模未显著增加。

3.3 交流潮流安全校核的平衡机设置

采用全网模型后，平衡机可设置在离自身电



网较远的节点，该处积累的偏差对本省潮流影响可近似为 0，同时消除了外省负荷预测偏差等原因造成的功率不平衡。

3.4 计算流程

省级电力现货市场全网安全校核出清流程如图 5 所示，使用区域上级调度下发的全网模型和省内模型数据作为市场出清的基础，系统每 15 min 定时接入抽取保存。考虑到实时市场出清计算时效性，将灵敏度计算单独作为外部计算，提高出清效率。

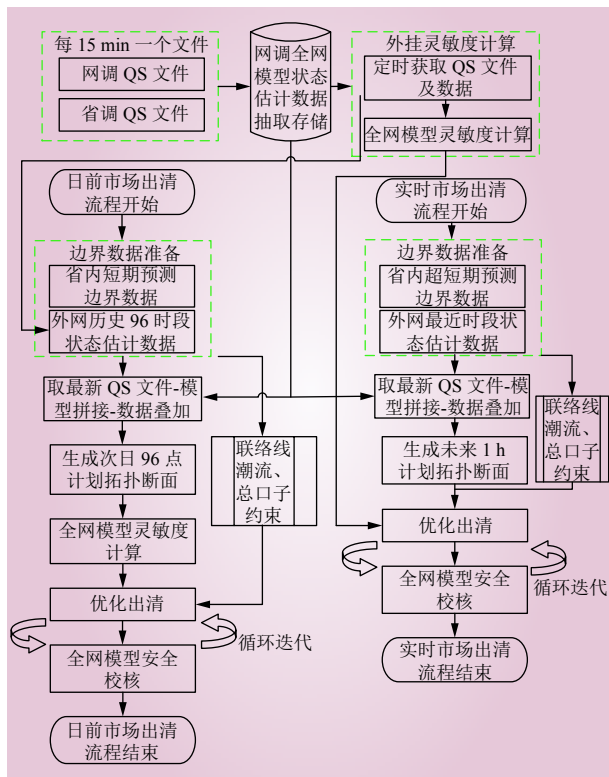


图 5 省级电力现货市场全网安全校核出清流程
Fig. 5 Network wide security check clearing process of provincial electricity spot market

由图 5 可以看出，该流程不仅实现了考虑全网模型的省级电力现货市场出清计算功能，而且通过外挂灵敏度计算方法，提升出清计算时效性，对实际系统工程应用具有较高的意义。

4 算例分析

4.1 实际系统算例

以某省电网 220 kV 以上系统进行实际计算分析（见表 2 和图 6）。全网总节点数 5 163，总支

路数 8 457。其中省级电网规模总节点数 900，总支路数 1 405。

表 2 算例系统规模
Table 2 Sizing of the study system

项目	省级电网	区域电网
节点数	900	5 163
支路数	1 405	8 457

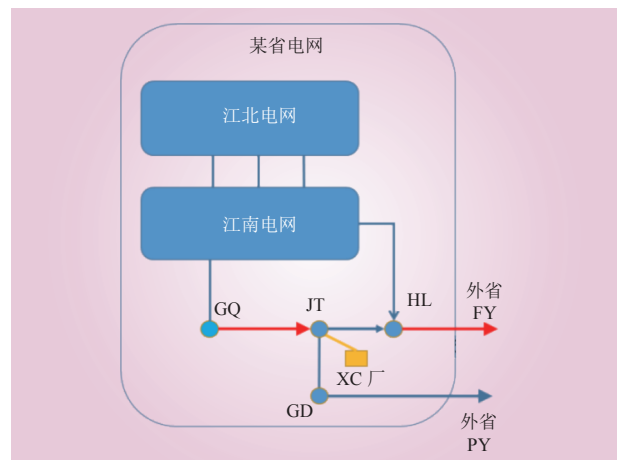


图 6 实际系统示意
Fig. 6 Illustration of the actual system for case studies

4.2 电网潮流

对于省际联络线潮流，传统等值法中联络线潮流是分解获得的，基于全网模型的出清机制实现了省际联络线潮流按实际计算，并按断面约束进行调整，避免了按等比例分解后等值的偏差。

以某省级日前市场为例，按分解等值的方法和全网模型计算方法，分别得到该省级电网 11 回省际联络线潮流，二者对比如表 3 所示。

可以看出，传统分解等值方法得到的联络线潮流与电网实际运行潮流平均偏差为 9.97%，而全网模型出清计算得到的联络线潮流与实际平均偏差仅为 0.26%。

结合 2.1 节省内平衡机偏差分析算例，可以看出平衡机设置对附近部分线路潮流计算结果影响较大，全网计算时远距离设置平衡机使省内潮流计算准确度更高，出清结果执行更安全。

4.3 节点灵敏度

以省内模型计算时，省际联络线已被等值，无法计算得到其他节点对其的灵敏度。而基于全网模型考虑了外网的电气联系，省际联络线不再



表 3 联络线潮流及偏差对比
Table 3 Comparison of tie line flow

线路名	实际值/MW	分解等值法		全网模型计算法	
		数值/MW	偏差/%	数值/MW	偏差/%
线路1	1108	1132	2.17	1050	-5.23
线路2	1087	1055	-2.94	1088	0.09
线路3	1082	1050	-2.96	1087	0.46
线路4	913	801	-12.27	835	-8.54
线路5	242	151	-37.60	234	-3.31
线路6	241	167	-30.71	252	4.56
线路7	913	804	-11.94	834	-8.65
线路8	994	788	-20.72	1124	13.08
线路9	990	785	-20.71	1121	13.23
线路10	3599	4095	13.78	3544	-1.53
线路11	3588	4100	14.27	3541	-1.31
平均偏差	/	/	-9.97	/	0.26

等值，将省际联络线作为可调整交流线路，可计算得到联络线对所有节点的灵敏度数据，为联络线重载或过载提供调节支持。

某省际联络线灵敏度数据计算结果如表 4 所示。

表 4 节点对联络线灵敏度数据对比
Table 4 Comparison of node to tie line sensitivity data

机组名称	等值模型灵敏度	全网模型灵敏度
A厂5号机组		0.41
B厂1号机组		0.40
C厂1号机组		0.39
D厂1号机组	无法计算	0.39
E厂1号机组		0.35
F厂3号机组		0.35
G厂1号机组		0.28

省内模型计算时忽略了外网与省内电网的电气联系，同时平衡机组在省内，导致节点有功功率变化对支路有功功率灵敏度偏差增大。

靠近省际联络线的某断面潮流对节点灵敏度计算结果如表 5 所示。

可以看出，使用全网模型后，联络线、省外各节点都参与安全校核，省内节点灵敏度数据准确性显著提高，为进一步正确调整潮流和合理计算电价提供必要基础。

表 5 省内机组和外网机组对断面的灵敏度对比
Table 5 Comparison of sensitivities between internal provincial units and external network units to the interface

电厂名称	省内模型灵敏度	全网模型灵敏度
省内A厂	-0.539	-0.298
省内B厂	0.088	0.193
省内C厂	0.086	0.186
省内D厂	0.086	0.185
省内E厂	0.077	0.180
外网A厂	/	0.142
外网B厂	/	0.166
外网C厂	/	0.140

4.4 节点电价

基于 4.2 节和 4.3 节算例，省际联络线断面约束纳入优化模型，并增加总交换计划约束。在安全校核优化出清迭代计算时，通过其灵敏度数据调整机组出力保证省间潮流不超限。因此，当省际联络线断面发生阻塞时，基于全网模型计算得到的灵敏度数据把阻塞价格反映到对应节点上，提升节点电价准确性，得到合理的节点电价。某省际联络线断面发生阻塞时的价格分析结果如表 6 所示。

由表 6 可以看出，省际联络线断面阻塞对省内发电节点电价产生影响（总阻塞价格=断面灵敏度×断面影子价格+其他断面阻塞分量），提升节点电价的合理性。

除了省际断面阻塞影响，省内支路灵敏度准确性提升同样让电网所有节点电价更为合理。以省内某断面和相关机组计算为例，部分节点灵敏度计算结果甚至符号相反，不仅会令机组功率对相关断面反向调整，进一步加剧超限程度，危及电网运行安全，而且计算出的节点电价不符合实际（阻塞电价相反），引发市场主体质疑。因此，省内所有优化变量（机组有功）对省内支路灵敏度准确性的提升，消除部分节点灵敏度计算偏差较大甚至计算方向相反的风险，不仅确保实时调度运行安全，并且使节点电价计算准确性显著提升（见表 7），符合电网实际运行情况，消除市场主体质疑的风险。

4.5 偏差和时效性评估

对于区域内的外省数据，因无法获取次日



表 6 机组对联络线断面价格分析
Table 6 Price analysis of unit to tie line interface

机组名称	日前机组出力/ MW	本段报价/ (元·(MW·h) ⁻¹)	节点电价/ (元·(MW·h) ⁻¹)	能量价格/ (元·(MW·h) ⁻¹)	总阻塞价格/ (元·(MW·h) ⁻¹)	断面 灵敏度	断面影子价格/ (元·(MW·h) ⁻¹)	其他断面阻塞分量 (元·(MW·h) ⁻¹)
A厂5号机组	997.5	480	492.57	651.47	-158.90	0.41	-555.24	68.75
B厂1号机组	598.0	474	482.91	651.47	-168.57	0.40	-555.24	53.53
C厂1号机组	180.0	462	440.49	651.47	-210.98	0.39	-555.24	5.56
D厂1号机组	630.0	800	738.90	651.47	87.43	0.39	-555.24	303.97
E厂1号机组	330.0	448	406.54	651.47	-244.93	0.35	-555.24	50.60
F厂3号机组	500.0	448	406.54	651.47	-244.94	0.35	-555.24	50.61
G厂1号机组	500.0	448	337.69	651.47	-313.78	0.28	-555.24	158.31

表 7 机组对省内支路价格分析
Table 7 Price analysis of unit to internal provincial branch

机组名称	日前机组 出力/MW	能量价格/ (元·(MW·h) ⁻¹)	断面影子价格/ (元·(MW·h) ⁻¹)	其他断面 阻塞分量 (元·(MW·h) ⁻¹)	总阻塞价格/ (元·(MW·h) ⁻¹)	省内模型 灵敏度	全网模型 灵敏度	省内模型 节点电价/ (元·(MW·h) ⁻¹)	全网模型 节点电价/ (元·(MW·h) ⁻¹)
A厂1号机组	160	651.47	-1000	-185.93	-244.93	-0.115	0.059	580.54	406.54
B厂3号机组	675	651.47	-1000	-128.98	-305.98	-0.157	0.177	679.49	345.49
C厂1号机组	330	651.47	-1000	-185.93	-244.93	-0.115	0.059	580.54	406.54

机组检修计划文件、设备检修计划文件，当外网机组、电气设备状态变化时，本省出清数据若未及时更新，会产生计算偏差，但在等值法中也存在这种偏差。距离本省较远的外网设备检修或机组出力变化，由于平衡机设置在省外（远离本省的机组），等效消除了对省内电网潮流的影响。距离本省较近（省际联络线附近）的设备检修对于该省潮流计算准确性有一定影响，如表 8 所示，但该影响限于日前市场。对于实时市场，因采用最新电网模型和方式（每 15 min 更新），以上偏差幅度对电网实际运行控制几乎没有影响。

对实际系统计算时效性进行评估。改进模型和算法后的计算耗时如表 9 所示。

表 8 外网电气设备状态变化影响分析
Table 8 Analysis on the effects of external network electrical equipment outage

项目	EH+ EF线	LF+ LY线	PF 5302线	TY 5353线
JZ厂 1号机	614/710	1238/1154	365/364	117/118
	15.64	6.78	0.27	0.85
JL厂 2号机	614/694	1238/1171	365/366	117/117
	13.00	5.41	0.27	0
CE厂 1号机	614/629	1238/1213	365/364	117/117
	2.44	2.02	0.27	0

表 9 计算效率
Table 9 Computing efficiency

项目	省网等值计算	区域全网计算
总节点数	900	5163
总支路数	1405	8457
优化变量数	23 976	29 076
约束数量	17 484	19 044
实时市场优化出清时长/s	23	23
安全校核时长/s	35	45

省级电网计算扩展为全网计算后，虽然单次安全校核计算耗时略有提升，但由于总耗时主要取决于优化出清时长和安全校核时长，总耗时未显著增加，满足生产实际需求。

5 结论

通过使用区域电网状态估计文件和本省拼接构成全网计算模型数据，并对计算流程、潮流安全校核、优化出清算法均进行了相应调整，有以下优势。

1) 使用全网模型和全网远距离设置平衡机，提高潮流计算准确性，降低了与实际潮流的偏差；提高了安全校核的准确性，使出清结果执行



可靠性高。

2) 使用全网模型提高了各节点对相关断面的灵敏度准确度, 消除部分节点灵敏度计算偏差偏大甚至方向相反的风险。

3) 使用全网模型, 准确计算包括省间联络线在内的所有断面阻塞价格, 从而获得准确的节点电价, 保证了出清结果的准确性, 消除市场主体质疑的风险。

为进一步提高现货市场计算准确度, 下一步应将上级调度的未来边界数据尽可能纳入本省出清计算, 以确保区域电网完全执行各省出清结果时的电网安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 房欣欣, 杨知方, 余娟, 等. 节点电价的理论剖析与拓展 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(2): 379–389.
FANG Xinxin, YANG Zhifang, YU Juan, *et al.* Theoretical analysis and expansion of node electricity price[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(2): 379–389.
- [2] 魏玢. 美国 PJM 电力市场及其对我国电力市场化改革的启示 [J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(8): 32–35.
WEI Fen. Experiences in PJM market in the United States: a good reference for the power market reform in China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(8): 32–35.
- [3] LI Z Y, SHAHIDEHPOUR M. Security-constrained unit commitment for simultaneous clearing of energy and ancillary services markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(2): 1079–1088.
- [4] OTT A L. Experience with PJM market operation, system design, and implementation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 528–534.
- [5] 邹鹏, 陈启鑫, 夏清, 等. 国外电力现货市场建设的逻辑分析及对中国的启示与建议 [J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(13): 18–27.
ZOU Peng, CHEN Qixin, XIA Qing, *et al.* Logical analysis of electricity spot market design in foreign countries and enlightenment and policy suggestions for China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(13): 18–27.
- [6] 葛睿, 陈龙翔, 王轶禹, 等. 中国电力市场建设路径优选及设计 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(24): 10–15.
GE Rui, CHEN Longxiang, WANG Yiyu, *et al.* Optimization and design of construction route for electricity market in China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(24): 10–15.
- [7] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制 [J]. *电网技术*, 2016, 40(4): 985–991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operation control of large-scale UHV AC/DC hybrid power grid[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(4): 985–991.
- [8] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2513–2522.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, *et al.* Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2513–2522.
- [9] 中共中央国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见 [EB/OL]. [2020-12-01]. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/tzgg/ggkx/201504/t20150409_676931.html.
- [10] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于开展电力现货市场建设试点工作的通知 [EB/OL]. (2017-09-05)[2020-10-01]. http://www.nea.gov.cn/2017-09/05/c_136585412.htm.
- [11] 夏清, 杨知方, 赖晓文, 等. 基于分时容量电价的新型电力现货市场设计 [J]. *电网技术*, 2022, 46(5): 1771–1779.
XIA Qing, YANG Zhifang, LAI Xiaowen, *et al.* Design of new spot market of electricity based on time-sharing capacity price[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(5): 1771–1779.
- [12] 段秦尉, 潮铸, 唐旭辰, 等. 考虑电力现货市场的互联网调度安全校核研究 [J]. *机械与电子*, 2022, 40(4): 46–49, 55.
DUAN Qinwei, CHAO Zhu, TANG Xuchen, *et al.* Research on security check of interconnected grid dispatching considering electricity spot market[J]. *Machinery & Electronics*, 2022, 40(4): 46–49, 55.
- [13] 宋永华, 包铭磊, 丁一, 等. 新电改下我国电力现货市场建设关键点综述及相关建议 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(10): 3172–3186.
SONG Yonghua, BAO Minglei, DING Yi, *et al.* Summary of the key points of China's electricity spot market construction under the new electricity reform and related suggestions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(10): 3172–3186.
- [14] 汪红波, 邵立政, 夏清, 等. 考虑交流可行性校验的现货市场全环节建模及修正策略 [J]. *中国电力*, 2022, 55(1): 142–150.
WANG Hongbo, SHAO Lizheng, XIA Qing, *et al.* Full process modeling and correction strategies for electricity spot market considering AC feasibility check[J]. *Electric Power*, 2022, 55(1):



- 142–150.
- [15] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [16] 张怀宇, 胡宏, 张粒子, 等. 复杂市场环境区域电网安全校核机制架构设计 [J]. 中国电力, 2021, 54(11): 11–18.
ZHANG Huaiyu, HU Hong, ZHANG Lizi, *et al.* Design of the security analysis mechanism with complex market condition for regional power grid[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 11–18.
- [17] 蔡帜, 张国芳, 王淼, 等. 电力市场环境区域和省级电网协同安全校核及校正 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3758–3768.
CAI Zhi, ZHANG Guofang, WANG Miao, *et al.* Collaborative security check and correction of regional and provincial power grids under the environment of power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3758–3768.
- [18] 路轶, 蔡帜, 张国芳, 等. 适应电力现货市场运营的省级电网安全校核实现方案 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 216–223.
LU Yi, CAI Zhi, ZHANG Guofang, *et al.* Implementation scheme of provincial power grid security check adapted to power spot market operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 216–223.
- [19] 中共中央国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见 (中发〔2015〕9号)[EB/OL]. (2015-03-16)[2020-11-14]. http://tgs.ndrc.gov.cn/zywj/201601/t20160129_773852.html.
- [20] 甘德强, 杨莉, 冯冬涵. 电力经济与电力市场 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [21] 王锡凡. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [22] 王锡凡, 王秀丽, 陈皓勇. 电力市场基础 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 145–149.

作者简介:

吴迪 (1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统运行管理工作, E-mail: wud2734@ah.sgcc.com.cn;

王正凤 (1976—), 男, 博士, 高级工程师 (教授级), 从事电力运行及电力市场研究, E-mail: wangzf0016@ah.sgcc.com.cn;

高卫恒 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力市场研究, E-mail: 58377566@qq.com;

应益强 (1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事电力市场研究, E-mail: ying20163318@163.com.

(责任编辑 李博)

Research on Power Grid Security Check for Provincial Electricity Spot Market

WU Di¹, WANG Zhengfeng¹, GAO Weiheng¹, YING Yiqiang²

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China; 2. Nari Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, NanJing 211000, China)

Abstract: For the provincial electricity market model in which the inter-provincial AC tie-lines are equivalent to load injections, the clearing results obtained from the models of market optimization clearing and corresponding security check need to be improved. With regards to such modeling strategy, the causes and effects of the deviations in the clearing results are analyzed in this paper. Then the regional power grid model-based optimization clearing model of provincial electricity spot market and the security check method are proposed. By consolidating the models of the entire power grid to generate the topology interface of the future period, the full network sensitivities are calculated to obtain the complete network sensitivity matrix for market optimization clearing and full network security verification iterations, such that the accurate power flow and locational marginal price (LMP) of the power grid can be derived. The case studies based on the actual system has verified the accuracy and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (No.52120021N01G).

Keywords: electricity spot market; LMP; dispatching; security check